



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

DEGRADASI SEYAWA 2,4(DIKLOROFENOKSI) ASAM ASETAT (2,4-D) DALAM PESTISIDA SEDAMIN 865 AS SECARA FOTOLISIS DENGAN PENAMBAHAN TiO₂-ANATASE

TESIS



ABINUL HAKIM
06207046

PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2008

**DEGRADASI SENYAWA 2,4 (DIKLOROFENOKSI) ASAM ASETAT (2,4-D)
DALAM PESTISIDA SIDAMIN 865 AS® SECARA FOTOLISIS
DENGAN PENAMBAHAN TiO_2 -ANATASE**

Oleh : Abinul Hakim

(Di bawah bimbingan Safni dan Hamzar Suyani)

Ringkasan

Kemajuan teknologi di bidang pertanian telah membuka peluang yang sangat luas bagi penggunaan pestisida. Akan tetapi penggunaan pestisida yang mengandung bahan aktif tertentu secara terus menerus dan tidak memperhatikan petunjuk serta saran penggunaannya dapat mengancam keselamatan lingkungan karena keberadaan residu dari bahan aktif pestisida yang tertinggal di dalam tanah dan di dalam air dapat berpotensi menghasilkan masalah lingkungan yang serius.

2,4 (diklorofenoksi) asam asetat yang lebih dikenal dengan sebutan 2,4-D merupakan salah satu bahan aktif herbisida yang banyak digunakan oleh petani. 2,4-D adalah salah satu herbisida yang sudah cukup lama digunakan di Amerika Serikat dan dibuat selama perang dunia kedua dan menjadi sangat terkenal karena merupakan salah satu bahan dasar *Agent Orange* yang begitu kontroversial selama Perang Vietnam. Sekarang herbisida dengan bahan aktif 2,4-D sangat banyak beredar di pasaran.

Residu pemakaian pestisida, khususnya 2,4-D yang tidak terkontrol di lahan-lahan pertanian merupakan tekanan yang sangat berat bagi ekosistem lingkungan perairan pantai/laut. Dengan demikian dapat digolongkan sebagai bahan pencemar (polutan) sehingga perlu dipikirkan untuk menanggulangi residu yang berbahaya itu.

Pengolahan limbah secara konvensional telah dilakukan seperti dengan cara pengendapan dan penyerapan dengan karbon aktif atau diproses secara mikrobiologi.

Akan tetapi pengolahan limbah dari residu pestisida secara konvensional kurang efektif. Salah satu alternatif dalam menjawab permasalahan tersebut adalah dengan proses oksidasi lanjut (AOPs; *Advanced Oxidation Process*), dimana fotokatalisis merupakan bagian dari proses tersebut. Penguraian senyawa organik seperti sisa pestisida pada lingkungan dengan penggunaan TiO_2 sebagai fotokatalis menarik banyak minat peneliti karena metoda ini memiliki keunggulan antara lain mudah ditangani dan efisiensinya tinggi. Fotokatalisis merupakan suatu proses yang dibantu dengan adanya sinar ultra violet (UV) dan material katalis diketahui memiliki banyak keuntungan yang penting, faktanya sejumlah besar senyawa organik di dalam air dapat dioksidasi menjadi mineral yang komplit seperti CO_2 dan H_2O . Reaksinya relatif tinggi karena area luas permukaan fotokatalis yang digunakan besar. Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar efektifitas dan efisiensi fotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase dapat mendegradasi senyawa 2,4-D.

Metoda fotolisis ini menggunakan lampu UV 10 watt dengan panjang gelombang 365 nm. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa metoda fotolisis dapat mendegradasi senyawa 2,4-D dengan konsentrasi 20 mg/L sebanyak 12,05 % dengan waktu irradiasi selama 180 menit. Untuk senyawa 2,4-D pada konsentrasi yang sama, waktu irradiasi selama 90 menit dengan penambahan TiO_2 -anatase sebanyak 0,100 g tanpa pengadukan terdegradasi sebanyak 31,55 %, dan dengan pengadukan sebanyak 90,93 %.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan perlu dilakukan investigasi terhadap produk fotodegradasi sehingga mekanisme fotodegradasi dan absorpsi 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat menggunakan metoda fotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase benar-benar diketahui (misalnya dengan menggunakan HPLC) dan sebaiknya dalam penambahan TiO_2 -anatase sebagai katalis tidak dicampurkan ke dalam sampel karena penggunaan TiO_2 serbuk dalam cairan berturbulensi tinggi tidak efisien karena

dua hal. Pertama, serbuk yang telah terdispersi dalam air sangat sulit diregenerasi; kedua, bila campuran terlalu keruh maka radiasi UV tidak mampu mengaktifkan seluruh partikel fotokatalisis. Disarankan menggunakan lapisan tipis TiO_2 pada permukaan gelas dengan teknik proses sol-gel.



**DEGRADASI SENYAWA 2,4 (DIKLOROFENOKSI) ASAM ASETAT (2,4-D)
DALAM PESTISIDA SIDAMIN 865 AS® SECARA FOTOLISIS
DENGAN PENAMBAHAN TiO_2 -ANATASE**

Oleh :

ABINUL HAKIM

06 207 046

TESIS

*Sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Magister Sains
pada Program Pascasarjana Universitas Andalas*

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS ANDALAS
2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa pernyataan dalam tesis Saya yang berjudul :

" Degradasi Senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) Dalam Pestisida

Sidamin 865 AS Secara Fotolisis Dengan Penambahan TiO_2 -Anatase"

adalah hasil kerja Saya sendiri dan bukan merupakan jiplakan dari hasil kerja / karya orang lain, kecuali kutipan yang sumbernya dicantumkan. Jika dikemudian hari pernyataan ini tidak benar maka status kelulusan dan gelar yang Saya peroleh menjadi batal dengan sendirinya.

Padang, 15 Juli 2008

Penulis

Abinul Hakim
06 207 046



RIWAYAT HIDUP

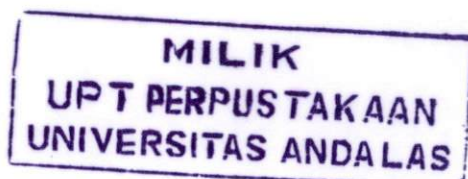
Penulis dilahirkan pada tanggal 9 April 1969 di Jakarta, sebagai anak ke tiga dari lima bersaudara dari pasangan Abdul Rahman Ishak (Alm) dan Sumirah.

Penulis menamatkan Sekolah Dasar pada tahun 1982 di SDN 03 Duren Sawit, Jakarta Timur, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 6 Jakarta tahun 1985 dan Sekolah Menengah Farmasi (SMF) IKIFA Jakarta tahun 1988. Setamat SMF bekerja sebagai asisten apoteker di beberapa apotek di Jakarta. Pada tahun 1990 penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Indonesia

Jakarta pada program diploma pendidikan kimia dengan beasiswa Bank Dunia dan memperoleh gelar sarjana muda pada tahun 1993.

Pada tahun 1994 penulis diangkat sebagai guru PNS mata pelajaran kimia di SMAN 1 Danggung-danggung (sekarang bernama SMAN 1 Guguk) di Kabupaten 50 Kota. Penulis menikah tahun 1998 dengan Sufnarrita Yusuf, AMd. Keb. dan sekarang dikaruniai dua orang putri dan dua orang putra yang bernama Syifa' MF, Syafiq MF, Shodiq MF dan Syaima' MF. Pada tahun 1995 penulis mendapat beasiswa dari Dirjen Pendidikan Tinggi (DIKTI) untuk melanjutkan pendidikan S1 ke Universitas Terbuka (UT) Jakarta jurusan pendidikan kimia dan memperoleh gelar sarjana tahun 1996.

Pada 1 Januari 2000 penulis pindah tugas ke SMA Negeri 8 Padang dan tahun 2005 terpilih menjadi Guru Berprestasi tingkat kota Padang dan Guru Berprestasi tingkat Provinsi Sumatera Barat. Penulis menyelesaikan studi pada Program Pascasarjana Universitas Andalas Padang dan memperoleh gelar Magister Sains tahun 2008 dengan Beasiswa dari Diknas Provinsi Sumbar.



KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan tesis ini. Tesis ini ditulis berdasarkan hasil penelitian yang berjudul ***"DEGRADASI SENYAWA 2,4 (DIKLOROFENOKSI) ASAM ASETAT (2,4-D) DALAM PESTISIDA SIDAMIN 865 AS® SECARA FOTOLISIS DENGAN PENAMBAHAN TiO_2 – ANATASE"***. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains pada program Pascasarjana Universitas Andalas Padang.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih penulis kepada :

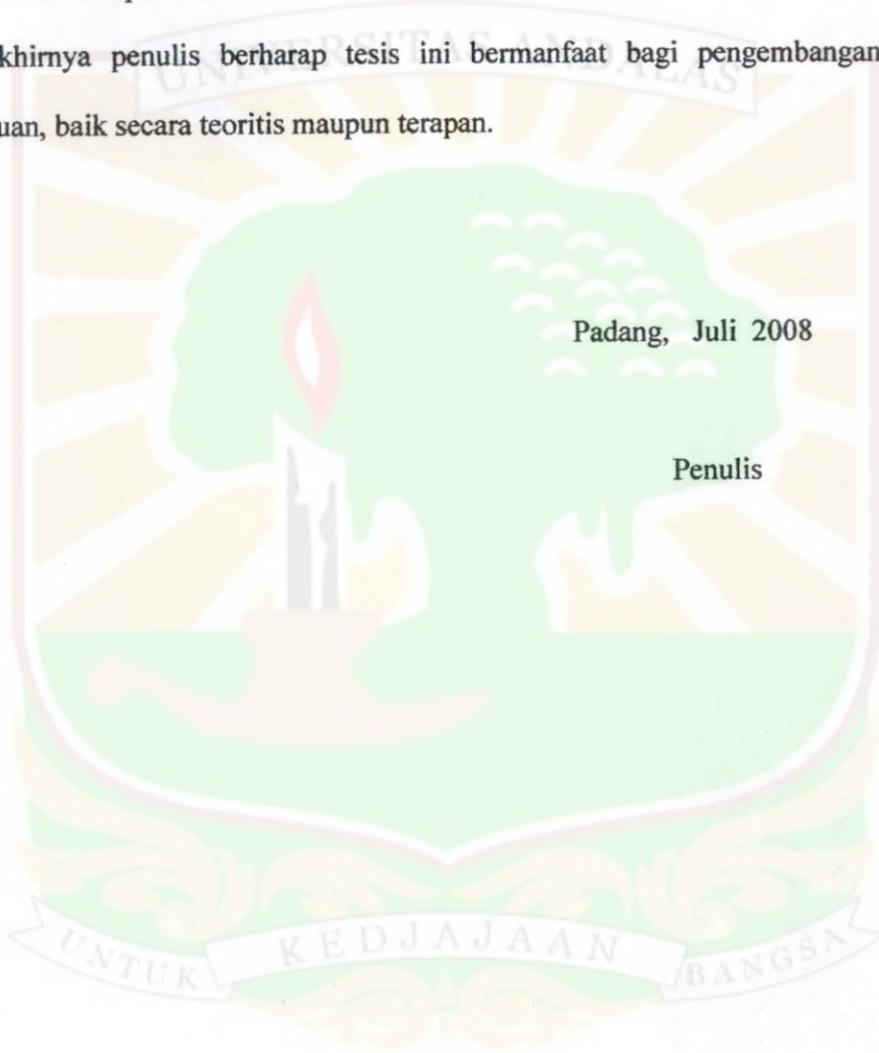
1. Kepala Dinas Pendidikan Sumatera Barat yang telah memberikan Beasiswa untuk peningkatan mutu guru-guru SMA.
2. Ibu Dr. Safni, M.Eng sebagai ketua komisi pembimbing.
3. Bapak Prof. Hamzar Suyani, M.Sc sebagai anggota komisi pembimbing.
4. Direktur (Prof. Dr. Ir. H. Novirman Jamarun, M.Sc), Asdir (Prof. Dr. Ir. Rudi Febriamansyah dan Prof. Dr. Emriadi, MS) serta segenap karyawan Pascasarjana Universitas Andalas Padang.
5. Bapak Dr. Djaswir Darwis, MS. DEA. sebagai ketua program studi kimia
6. Bapak Prof. Tadao Sakai dari Aichi Institute of Technology Japan, atas sumbangan TiO_2 -anatase dan bantuan beberapa peralatan.
7. Bapak/Ibu Dosen jurusan kimia FMIPA Universitas Andalas Padang yang telah memberikan ilmu pengetahuan pada penulis.
8. Ibu Sumijar Tanjung dan Ibu Nofrida, S.Sos sebagai Analis di Laboratorium Analisis Terapan jurusan kimia FMIPA Universitas Andalas Padang.
9. Istri dan anak-anak tercinta yang selalu memberikan motivasi

10. Orang tua dan keluarga besar di Jakarta dan Padang yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materil.
11. Rekan rekan satu pembimbing ; Yuni Era, Desmiati Masri, Helma Nismar dan Sri Rezki Nofriani yang selalu berbagi dalam suka dan duka.
12. Keluarga Besar SMA Negeri 8 Padang yang telah memberikan energi semangat untuk selalu berprestasi.

Akhirnya penulis berharap tesis ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, baik secara teoritis maupun terapan.

Padang, Juli 2008

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Identifikasi dan Pembatasan masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. 2,4 (Diklorofenoksi) Asam Asetat (2,4-D).....	6
2.2. Fotolisis	7
2.2.1. Fotokatalisis semikonduktor.....	9
2.2.2. Mekanisme fotokatalisis semikonduktor	11
2.3. Titanium dioksida	12
2.3.1. Titanium dioksida dan karakternya sebagai fotokatalis	12
2.3.2. Karakter TiO ₂ sebagai fotokatalis.....	14
2.4. Spektrofotometri UV-Vis.....	15
III. BAHAN DAN METODE	
3.1. Tempat dan waktu penelitian	17
3.2. Alat dan Bahan	17
3.2.1. Alat	17
3.2.2. Bahan	17
3.3. Prosedur kerja	18
3.3.1. Pengukuran spektrum serapan 2,4-D	18
3.3.2. Degradasi 2,4-D Secara Fotolisis Dengan Variasi Waktu	18
3.3.3. Degradasi 2,4-D Secara Fotolisis Dengan Variasi Berat TiO ₂ anatase	18
3.3.4. Pengaruh Pengadukan Terhadap Persentase Degradasi 2,4-D.....	19

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengukuran Spektrum Serapan 2,4-D	20
4.2. Pengaruh waktu irradiasi terhadap degradasi 2,4-D	21
4.3. Pengaruh TiO ₂ .anatase terhadap degradasi 2,4-D	22
4.4 Pengaruh Pengadukan terhadap Persentase Degradasi dengan Variasi Waktu Fotolisis.....	24

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	27
5.2. Saran	27

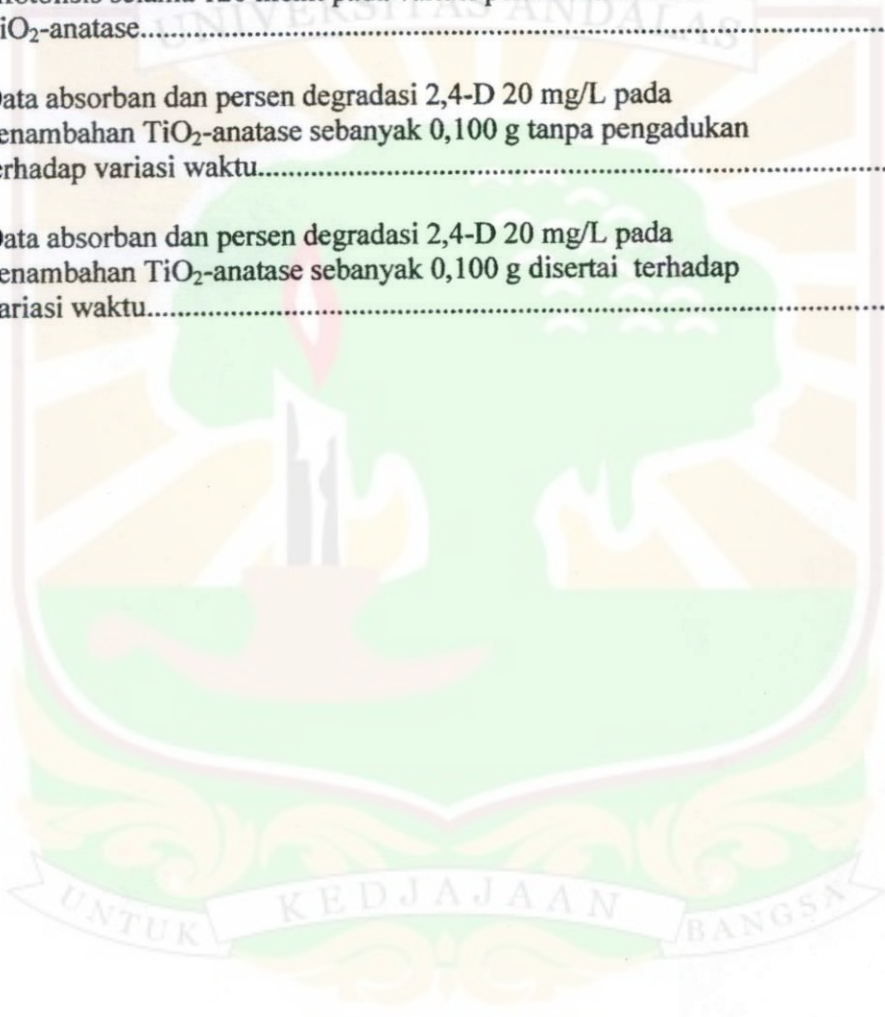
DAFTAR PUSTAKA	28
-----------------------------	----

LAMPIRAN	31
-----------------------	----



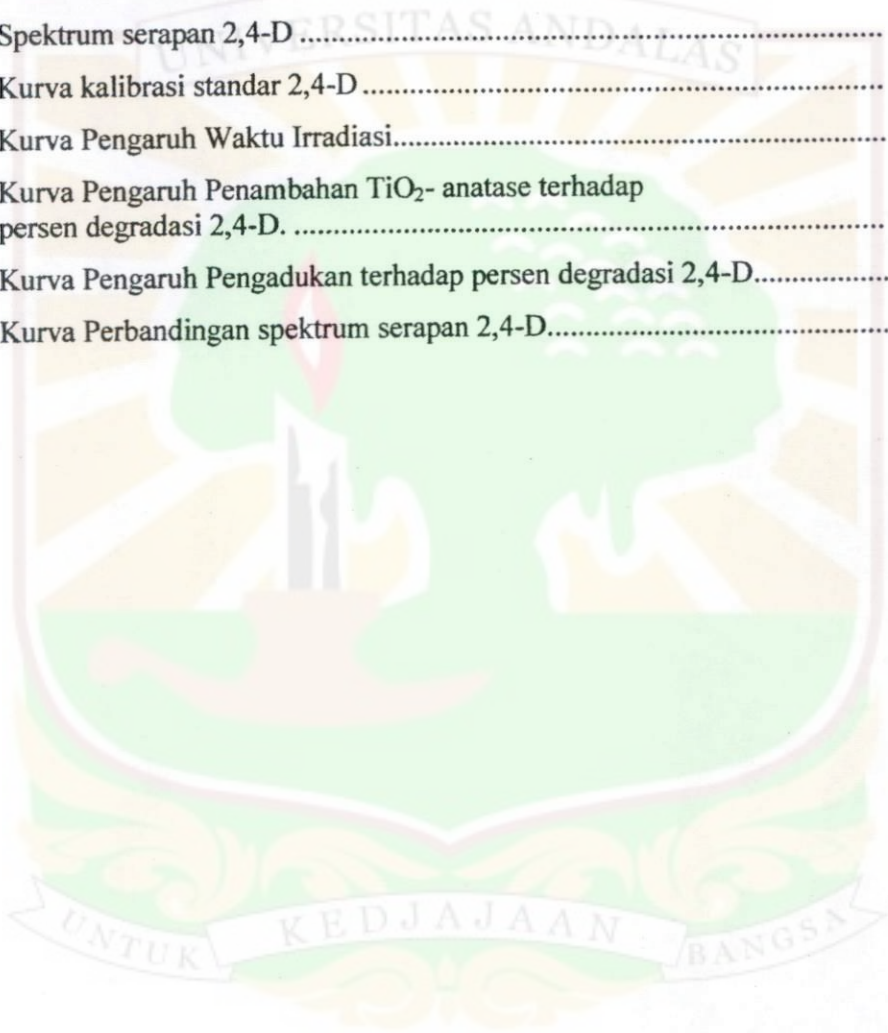
DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1	Data absorban 2,4-D pada variasi konsentrasi 31
2	Data absorban dan persen degradasi 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis pada variasi waktu tanpa penambahan TiO_2 -anatase..... 33
3	Data absorban dan persen degradasi 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis selama 120 menit pada variasi penambahan berat TiO_2 -anatase..... 34
4	Data absorban dan persen degradasi 2,4-D 20 mg/L pada penambahan TiO_2 -anatase sebanyak 0,100 g tanpa pengadukan terhadap variasi waktu..... 35
5	Data absorban dan persen degradasi 2,4-D 20 mg/L pada penambahan TiO_2 -anatase sebanyak 0,100 g disertai terhadap variasi waktu..... 36



DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Rumus struktur 2,4-D	7
2	Proses fotokonduksi	10
3	Mekanisme Reaksi Fotokatalitik.....	12
4	Struktur kristal TiO_2	13
5	Spektrum serapan 2,4-D	20
6	Kurva kalibrasi standar 2,4-D	21
7	Kurva Pengaruh Waktu Irradiasi.....	22
8	Kurva Pengaruh Penambahan TiO_2 - anatase terhadap persen degradasi 2,4-D.	23
9	Kurva Pengaruh Pengadukan terhadap persen degradasi 2,4-D.....	25
10	Kurva Perbandingan spektrum serapan 2,4-D.....	25



DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1	Perhitungan penentuan absorpsivitas molar (ϵ) 31
2	Perhitungan persentase 2,4-D 20 mg/L pada variasi waktu 33
3	Perhitungan persentase 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis selama 120 menit pada variasi penambahan TiO_2 -anatase 34
4	Perhitungan persentase 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis tanpa pengadukan selama 90 menit pada variasi penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase 35
5	Perhitungan persentase 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis disertai pengadukan selama 90 menit pada variasi penambahan 0,100 g TiO_2 - anatase 36
6	Skema alat fotolisis 37



I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pestisida adalah substansi kimia yang digunakan untuk membunuh atau mengendalikan berbagai hama. Kata pestisida berasal dari kata “pest”, yang berarti hama dan “cida” yang berarti pembunuh. Jadi secara sederhana pestisida diartikan sebagai pembunuh hama. Pengertian hama bagi petani sangat luas, yaitu tungau, tumbuhan pengganggu, penyakit tanaman yang disebabkan oleh fungi (jamur), bakteri dan virus, kemudian nematoda (cacing yang merusak akar), siput, tikus, burung dan hewan lain yang dianggap merugikan (Sudarmo, 1991).

Pestisida merupakan salah satu hasil teknologi modern yang mempunyai peranan penting dalam peningkatan kesejahteraan rakyat. Penggunaannya dengan cara yang tepat dan aman adalah hal mutlak yang harus dilakukan mengingat pestisida merupakan bahan yang beracun. Penggunaan pestisida perlu dikelola sedemikian rupa, sehingga manfaatnya dapat dioptimalkan dan efek samping yang membahayakan dapat ditekan sekecil mungkin (Sudarmo, 1991).

Berdasarkan PP No.7 tahun 1973 yang dimaksud dengan pestisida adalah semua zat kimia dan bahan lain serta jasad renik dan virus yang dipergunakan untuk memberantas atau mencegah hama dan penyakit yang merusak tanaman atau hasil pertanian, memberantas gulma, membunuh atau mengendalikan berbagai hama yang dianggap merugikan atau penyakit yang merusak tanaman, bagian tanaman atau hasil pertanian. Pada umumnya pestisida yang digunakan untuk pengendalian jasad pengganggu adalah racun berbahaya, tentu saja dapat mengancam kesehatan manusia. Penggunaan pestisida yang tidak bijaksana akan menimbulkan efek samping yang merugikan bagi kesehatan manusia, sumber daya hayati ataupun lingkungan pada umumnya (Sudarmo, 1991).

Kemajuan teknologi di bidang pertanian telah membuka peluang yang sangat luas bagi penggunaan pestisida. Mengingat kebutuhan dan kegunaan pestisida telah banyak produk pestisida yang beredar di masyarakat, dimana masing-masing jenis pestisida mempunyai fungsi dan daya racun yang berbeda-beda. Di samping dapat membantu manusia dalam usaha mengatasi gangguan hama dan penyakit, ternyata penerapan pestisida memberi pengaruh yang besar terhadap organisme atau lingkungan lainnya. Pestisida dapat digolongkan sebagai bahan pencemar atau polutan (Lasut *et al.*, 2001).

Suatu alternatif dalam menjawab permasalahan tersebut adalah dengan proses oksidasi lanjut (AOPs; Advanced Oxydation Process). Fotolisis merupakan bagian dari proses ini (Yulianto *et al.*, 2005). Fotolisis merupakan suatu proses yang dibantu dengan adanya cahaya dan material katalis. Dengan pencahayaan ultraviolet kebanyakan polutan organik (seperti zat warna dan pestisida) dapat dioksidasi menjadi CO_2 dan H_2O (Kuo dan Ho, 2001).

2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) adalah senyawa pestisida yang tergolong herbisida organoklor yang banyak digunakan petani di dunia dan merupakan salah satu dari 5 herbisida yang paling banyak dipakai di Indonesia, yaitu diuron, 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D), ametrin, paraquat, dan glifosat (Sriyani, 2006). 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) tergolong herbisida selektif, efektif membunuh tanaman berdaun lebar (pada tanaman coklat, karet, sawit, kopi, teh, padi dan tebu) dan tanaman berdaun sempit (pada tanaman karet) (Prado *et al.*, 2001). Penggunaan pestisida 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) yang sangat luas di bidang pertanian ternyata memberikan dampak yang sangat buruk bagi lingkungan dan degradasi alamiah di perairan sangat lambat yaitu 13 sampai 170 hari (Walter, 2006). Cara yang telah dilakukan untuk menghilangkan polutan pestisida yang mencemari perairan dan tanah adalah dengan teknik flokulasi, filtrasi dan adsorpsi. Tetapi teknik ini hanya

mengurangi kadarnya saja dan tidak mendegradasinya. Biodegradasi juga salah satu metoda penting dalam mendegradasi limbah pestisida, tetapi banyak senyawa organik pestisida yang sangat resisten terhadap mikroorganisme pendegradasi. Salah satunya adalah senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D). Oleh sebab itu perlu dicari metoda alternatif yang lebih efektif untuk menguraikan residu dari pemakaian pestisida tersebut (Jafari dan Marofi, 2005).

Pengolahan limbah secara konvensional dilakukan dengan cara klorinasi, pengendapan, dan penyerapan oleh karbon aktif, atau diproses secara mikrobiologi akan tetapi pengolahan limbah dari residu pestisida secara konvensional kurang efektif karena struktur senyawa organik yang terdapat dalam residu mengandung cincin benzena. Di sisi lain penggunaan karbon aktif hanya menyerap pencemar organik yang bersifat non-polar dengan berat molekul rendah. Proses mikrobiologi hanya dapat menguraikan senyawa *biodegradable*, sedangkan senyawa *non-biodegradable* tetap berada dalam lingkungan, akibatnya terjadi akumulasi senyawa tersebut di alam (Andayani dan Sumartono, 1999).

TiO₂-anatase adalah katalis yang efektif digunakan untuk mendegradasi senyawa-senyawa organik toksik. Hal ini terbukti dari beberapa hasil penelitian tentang zat warna, seperti : Sudan I terdegradasi 100 % setelah diiradiasi selama 180 menit dengan penambahan TiO₂-anatase (Safni *et al.*, 2008), naphthol blue black terdegradasi sebesar 100 % setelah diiradiasi selama 60 menit dengan penambahan TiO₂-anatase (Safni *et al.*, 2007) dan alizarin terdegradasi sebesar 100 % setelah diiradiasi selama 30 menit dengan penambahan TiO₂-anatase (Safni *et al.*, 2008).

Metoda fotolisis dengan penambahan TiO₂-anatase telah terbukti dapat mendegradasi beberapa zat warna seperti dijelaskan di atas. Dalam penelitian ini akan dilakukan proses degradasi terhadap pestisida dengan bahan aktif 2,4 (diklorofenoksi)

asam asetat (2,4-D) yang banyak digunakan dibidang pertanian, menggunakan metoda fotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka perlu diteliti seberapa besar efektifitas dan efisiensi fotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase dapat mendegradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D).

1.3. Identifikasi dan Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan iradiasi UV dengan TiO_2 -anatase sebagai katalis dalam mendegradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D). Parameter perlakuan yang diujicobakan dalam penelitian ini meliputi : variasi waktu irradiasi, variasi berat TiO_2 , dan pengaruh pengadukan selama iradiasi pada proses degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) menggunakan metoda fotolisis. Larutan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) sebelum dan setelah difotolisis diukur absorbannya dengan spektrofotometer UV-Vis untuk selanjutnya dihitung persentase degradasinya.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) yang difotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase pada beberapa kondisi perlakuan, yaitu : variasi waktu irradiasi, variasi berat TiO_2 -anatase dan pengaruh pengadukan selama proses irradiasi.

1.5. Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini dapat diketahui persentase 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) yang terdegradasi secara fotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase. Selanjutnya dapat diharapkan adanya pengembangan teknologi dalam mendegradasi senyawa pestisida yang bersifat toksik dan mencemari lingkungan.



II. TINJAUAN PUSTAKA

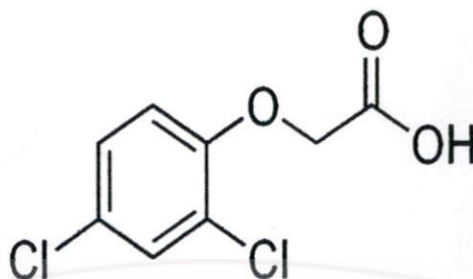
2.1. 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D)

Pestisida merupakan senyawa kimia beracun, racun terhadap serangga, gulma, menitur dan hama lain yang tidak disukai. Umumnya pestisida berpotensi membahayakan bagi manusia dan dapat menyebabkan kanker, cacat lahir, perubahan dalam material yang dapat diturunkan kepada generasi berikutnya (mutasi genetik) dan kerusakan syaraf (Riza dan Gayatri, 1994).

2,4 (diklorofenoksi) asam asetat yang lebih populer dengan sebutan 2,4-D merupakan salah satu bahan aktif herbisida yang banyak digunakan oleh petani. 2,4-D adalah salah satu herbisida yang sudah cukup lama digunakan di Amerika Serikat dan dibuat selama perang dunia kedua dan menjadi sangat terkenal karena merupakan salah satu bahan dasar *Agent Orange* yang begitu kontroversial selama Perang Vietnam. Sekarang herbisida dengan bahan aktif 2,4-D sangat banyak beredar di pasaran (Tu *et al.*, 2001).

2,4-D merupakan herbisida sistemik purna tumbuh untuk mengendalikan gulma berdaun lebar pada tanaman kakao (*Ageratum conyzoides*, *Hyptis capitata*), karet (*Borreria alata*, *Mimosa pudica*, *Oplismenus compositus*, *Chromolaena odorata*, *Melastoma affine*), gulma berdaun sempit (*Paspalum conjugatum*) kelapa sawit (*Borreria latifolia*, *Borreria lavicaolis*), kopi (*Ageratum haustorianum*, *Hyptis brevifex*, *Mikania micrantha*), padi sawah (*Monochoria vaginalis*, *Limnocharis flava*, *Marsilea crenata*, *Ludwigia adscendens*, *Jussiaea repens*), tebu (*Ipomoea triloba*) dan teh (*Mikania cordata*, *Synedrella nodiflora*). Lebih dari 100 merek dagang dari bahan aktif pestisida 2,4-D dijual di pasaran Indonesia (Deptan, 2006). Bahan aktif 2,4-D termasuk herbisida golongan phenoxy yang mudah larut dalam air dan mempunyai nama 2,4

(diklorofenoksi) asam asetat dengan rumus struktur sebagai berikut (Juo dan Ogini, 1978) :



Gambar 1. Rumus struktur 2,4-D

2,4-D diperdagangkan dalam bentuk asam, garam amina dan ester dengan formulasi AS, SL atau EC. Di pasaran pestisida diberi nama berdasarkan jenis formulasinya antara lain : Emulsifiable Concentrate (EC), Emulsifiable Solution (ES), Aqueous Solution (AS), Wettable Powder (WP), Soluble Liquid (SL), Granule (G), Water Dispersible Granule (WDG), Water Soluble Powder (WSP), Dust (D) dan Soluble Concentrate in Oil (SCO). Herbisida 2,4-D ini dikenal dengan nama dagang yang cukup dikenal yaitu Aqua-Kleen, Barrage, Weedone, Rumtox 45 WP, Sidamin AS, dan lain-lain.

Residu pemakaian pestisida, khususnya 2,4-D yang tidak terkontrol di lahan-lahan pertanian merupakan tekanan yang sangat berat bagi ekosistem lingkungan perairan pantai/laut, dengan demikian dapat digolongkan sebagai bahan pencemar (polutan) sehingga perlu dipikirkan untuk menanggulangi residu yang berbahaya itu. (Lasut *et al.*, 2001).

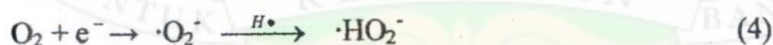
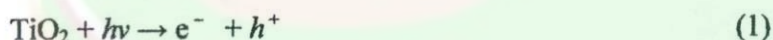
MILIK
UPT PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS ANDALAS

2.2. Fotolisis

Fotolisis merupakan suatu proses degradasi yang dibantu oleh adanya cahaya. Ketika material fotolisis disinari cahaya, material tersebut menyerap energi foton dan

menyebabkan berbagai reaksi kimia. Dalam media air, kebanyakan senyawa-senyawa organik seperti sianida dan nitrit yang beracun dapat diubah menjadi senyawa lain yang relatif tidak beracun (Gunlazuardi, 2001). Proses fotolisis yang menggunakan katalis dikenal dengan fotokatalisis. Beberapa oksida dan sulfida logam yang bersifat semikonduktor seperti TiO_2 , ZnO , SrTiO_3 , CdS dan ZnS dapat digunakan sebagai katalis pada proses fotolisis (Kamat, 2003).

Titanium dioksida (TiO_2) adalah katalis semikonduktor yang paling umum digunakan. Dengan pencahayaan ultraviolet ($\lambda < 405 \text{ nm}$), permukaan TiO_2 mempunyai kemampuan menginisiasi reaksi kimiawi. Penyinaran permukaan TiO_2 (bersifat semikonduktor) menghasilkan pasangan elektron dan *hole* positif pada permukaannya. Banyak polutan organik terurai menjadi karbondioksida dan air karena efek *hole* dengan potensial oksidasi yang tinggi (Kameyama, 2002). Absorpsi sinar UV oleh titanium dioksida akan diikuti perpindahan elektron pita valensi ke pita konduksi dimana terbentuk pasangan elektron pada pita konduksi (e^-_{pk}) dan lubang positif pada pita valensi (h^+_{pv}). Adamson (1990) mengemukakan bahwa dalam mekanisme fotokatalisis semikonduktor TiO_2 melibatkan spesi oksigen reaktif sebagai berikut:



Terlihat bahwa ketersediaan oksigen, substrat atau senyawa yang akan didegradasi tidak mengalami transfer muatan secara langsung tapi melibatkan terbentuknya hidrogen peroksida sebagai sumber radikal hidroksil. Metoda fotolisis dalam proses kimianya menghasilkan radikal hidroksil dalam larutan berair yang akan menyerang senyawa organik untuk mengawali proses mineralisasi.

2.2.1. Fotokatalisis Semikonduktor

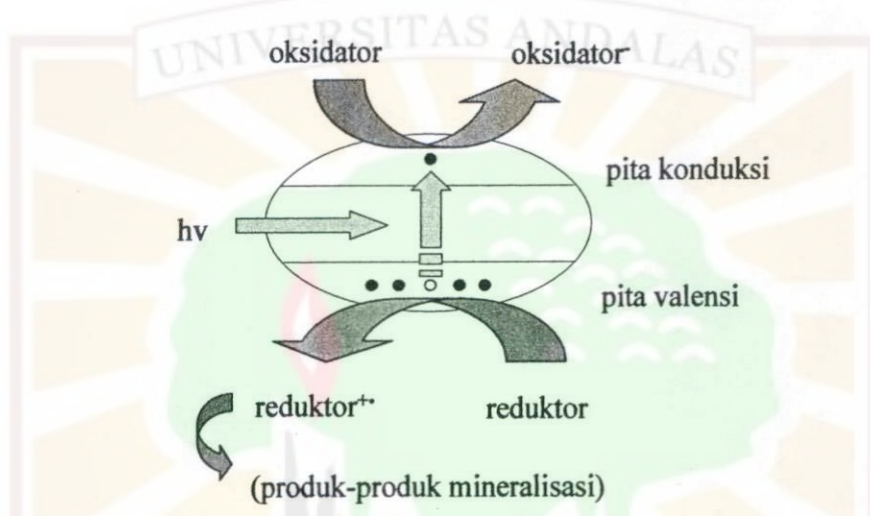
Material semikonduktor memiliki perbedaan energi antara pita valensi dan pita konduksi sehingga memungkinkan adanya hantaran listrik. Proses eksitasi elektron ke pita konduksi dengan meninggalkan lubang h_{pv}^+ pada semikonduktor tipe n hanya terjadi jika pita konduksi kosong dan pita valensi terisi penuh elektron. Semikonduktor dapat dimanfaatkan sebagai fotokatalis dalam suatu reaksi redoks karena memiliki kemampuan untuk menghasilkan pasangan h_{pv}^+ dan e_{pk}^- . Pada proses fotokatalisis, radiasi permukaan semikonduktor dengan cahaya yang memiliki energi lebih besar dari pada celah pita (band gap) akan menghasilkan daya redoks kuat, yang mampu mempromosikan berbagai reaksi kimia. Satu atau lebih langkah reaksi melibatkan pasangan elektron dan hole (e_{pk}^- dan h_{pv}^+) pada permukaan bahan semikonduktor.

Proses yang mungkin terjadi setelah fotokonduksi jika semikonduktor berada dalam medium (cair, gas) adalah :

1. Jika pada permukaan semikonduktor tidak terdapat spesi penahan pasangan h_{pv}^+ - e_{pk}^- maka suatu proses rekombinasi (elektron pada pita konduksi kembali ke pita valensi) akan terjadi dalam hitungan nanodetik (ns). Elektron dan hole akan bergabung kembali disertai pelepasan energi panas.
2. Jika terdapat spesi penahan maka rekombinasi dapat dicegah yang memungkinkan senyawa-senyawa yang teradsorpsi pada permukaan

semikonduktor (metastabil) mengalami reaksi redoks. Proses jebakan elektron pada pita konduksi menyebabkan elektron tidak kembali ke pita valensi dan bereaksi dengan spesi donor dan akseptor elektron melalui suatu proses antar muka menghasilkan suatu proses fotoelektrokimia.

Proses fotokonduksi yang merangsang terjadinya reaksi kimia seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses fotokonduksi

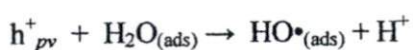
Gambar 2 menerangkan bahwa pada tahap awal terjadi penyerapan foton berfrekwensi ν dengan energinya yang besar atau sama dengan energi celah antara pita valensi dan pita konduksi. Selanjutnya sebuah elektron pada pita valensi tereksitasi ke pita konduksi meninggalkan lubang atau *hole* yang bermuatan positif. Elektron pada pita konduksi ditangkap oleh senyawa akseptor elektron (oks) sedangkan *hole* pada pita valensi diisi oleh elektron dari senyawa donor elektron (red), senyawa terakhir menjadi reaktif dan terdekomposisi ke bentuk mineralisasi.

Hole pada pita valensi merupakan oksidator kuat sedangkan e^-_{pk} merupakan reduktor yang baik. Hampir semua fototransformasi senyawa organik dapat terjadi dengan memanfaatkan daya oksidator dari h^+_{pv} baik secara langsung maupun tidak

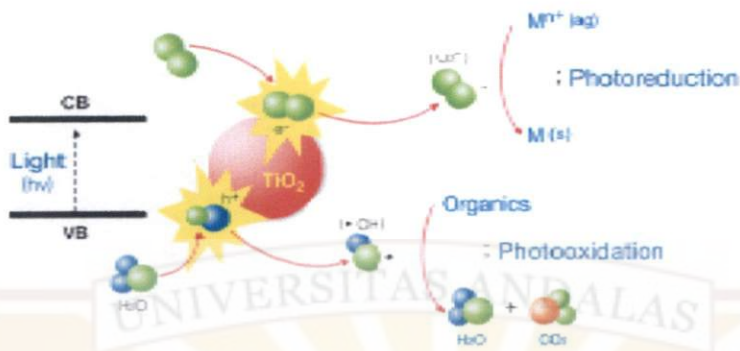
langsung dan agar reaksi redoks dapat berlangsung maka harus ada senyawa lain yang bereaksi dengan e^-_{pk} .

2.2.2. Mekanisme Fotokatalisis Semikonduktor

Secara umum mekanisme reaksi fotokatalitik dideskripsikan sebagai berikut : ketika suatu semikonduktor yaitu katalis tersuspensi dalam suatu larutan disinari oleh sinar dengan energi yang melebihi atau sama dengan band gap dari semikonduktor tersebut, maka pada permukaan katalis tersebut akan terbentuk pasangan elektron (e^-_{pk} dan h^+_{pv}). Dalam hal ini semikonduktor yang digunakan adalah TiO_2 dimana mempunyai band gap (energi celah) sebesar 3,2 eV, sehingga cahaya yang digunakan harus mendekati UV dengan panjang gelombang lebih kecil dari 410 nm. Pada pasangan elektron yang terbentuk dipermukaan katalis, muatan positif h^+ akan berpindah menuju area anoda dari katalis yang berkemampuan untuk mengoksidasi HO^- membentuk HO^\bullet radikal, kemudian polutan dalam limbah cair akan didegradasi oleh OH^\bullet radikal tersebut membentuk zat yang tidak berbahaya seperti CO_2 dan asam mineral, sedangkan elektron akan berpindah menuju area katoda dari katalis dan melakukan setengah reaksi reduksi terhadap oksigen dalam limbah cair membentuk H_2O , apabila kondisi air limbah tidak mengandung oksigen yang memadai karena keberadaan nitrogen dan air limbah mengandung banyak ion logam h^+_{pv} , maka dalam hal ini elektron diharapkan dapat mereduksi ion logam tersebut, dengan catatan bahwa proses reduksi akan terjadi jika potensial reduksi dari logam lebih besar dari level terendah dari energi celah (Yulianto, 2005). Adapun persamaan reaksi dari reaksi oksidasi yang terjadi adalah sebagai berikut (Gunlazuardi dan Winarti, 2002):



Dengan mekanisme reaksi seperti Gambar 3.



Gambar 3. Mekanisme Reaksi Fotokatalitik
(Kamat, 2003)

Beberapa penelitian dengan menggunakan fotokatalitik membuktikan bahwa proses tersebut dapat digunakan untuk memecah atau menghancurkan tipe polutan organik, selain itu juga dapat digunakan untuk proses pemurnian air, penghancuran bakteri, virus dan pengambilan logam dari aliran limbah.

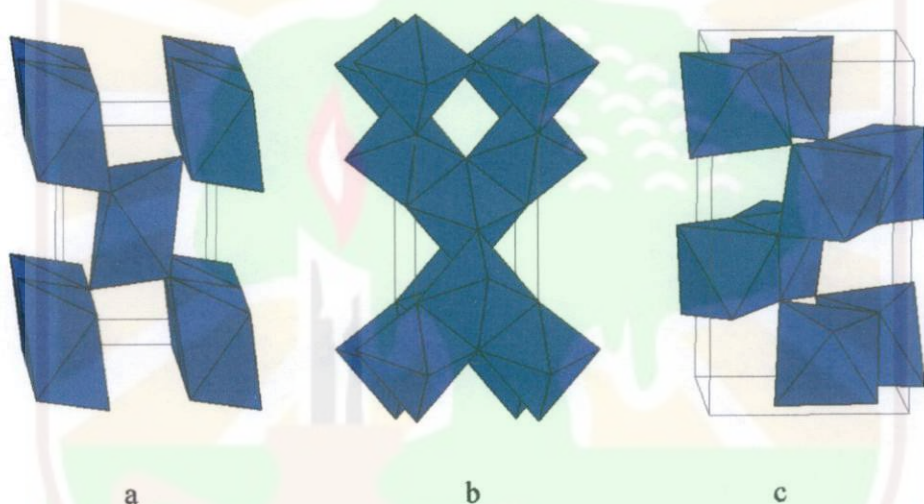
2.3. Titanium dioksida

2.3.1. Titanium dioksida dan karakternya sebagai fotokatalis

Titanium dioksida (TiO_2) dikenal sebagai semikonduktor tipe-n yang memiliki celah energi relatif besar dengan sifat super hidrofilik ketika terkena cahaya. TiO_2 merupakan senyawa dioksida berwarna putih yang tahan karat dan tidak beracun. TiO_2 sering digunakan sebagai katalis untuk dekomposisi senyawa-senyawa organik toksik seperti pestisida, zat warna dan lain-lain. TiO_2 biasanya terdapat dalam bentuk powder atau lapisan film tipis, bersifat amfoter dan sulit larut dalam air. Berat molekulnya 79,90 g/mol dimana kadar Ti 59,95 % dan kadar O 40,05 %. Titik leleh dari TiO_2 adalah 1870 °C. TiO_2 merupakan salah satu katalis yang paling stabil, paling sering digunakan

dibandingkan dengan katalis lainnya. TiO_2 menunjukkan kestabilan yang tinggi secara kimia dan relatif tidak mahal (Fujishima *et al.*, 2000).

TiO_2 memiliki tiga macam struktur kristal yaitu anatase, rutile dan brookite. Anatase dikenal sebagai kristal yang paling reaktif terhadap cahaya. Anatase memiliki aktivitas fotokatalitik terbaik, eksitasi elektron ke pita konduksi dapat dengan mudah terjadi apabila kristal ini dikenai cahaya dengan energi yang lebih besar dari pada celah energinya. Gambar 4 menunjukkan struktur kristal rutile, anatase dan brookite.



Gambar 4. Struktur Kristal TiO_2

a. Kristal rutile, b. Kristal anatase dan c. Kristal brookite

(Fujishima *et al.*, 2008)

TiO_2 merupakan katalis yang paling cocok digunakan untuk degradasi senyawa organik, karena TiO_2 paling aktif dan praktis untuk diaplikasikan dalam penanganan masalah lingkungan seperti pengolahan limbah cair, pengendalian limbah berbahaya, purifikasi udara dan desinfeksi air (Kameyama, 2002). TiO_2 sebagai fotokatalis dipelajari secara ekstensif untuk degradasi polutan lingkungan. TiO_2 biasanya dalam bentuk bubuk atau lapisan film tipis. Reaksi fotokatalitik terjadi pada permukaan, oleh

karena itu sifat permukaan TiO_2 menjadi faktor penting yang menentukan kinetika dan mekanisme reaksi fotokatalitik.

2.3.2. Karakter TiO_2 sebagai Fotokatalis

Perbedaan struktur kristal TiO_2 mengakibatkan perbedaan tingkat energi struktur pita elektroniknya. Tingkat energi hasil hibridisasi yang berasal dari kulit 3d titanium bertindak sebagai pita konduksi sedangkan tingkat energi hasil hibridisasi dari kulit 2p oksigen bertindak sebagai pita valensi. Konsekuensinya, posisi tingkat energi pita valensi, pita konduksi dan besarnya energi gap akan berbeda bila lingkungan dan/atau penyusunan atom Ti dan O di dalam kristal TiO_2 berbeda, seperti pada struktur anatase ($E_g = 3,2 \text{ eV}$) dan rutile ($E_g = 3,0 \text{ eV}$).

Besarnya energi celah (E_g), posisi energi pita konduksi dan pita valensi akan menentukan karakter fotokatalis dalam hal kebutuhan energi foton yang diperlukan untuk mengaktifkan dan berapa kekuatan oksidasi atau reduksinya setelah diaktifkan. Energi celah sebesar 3,2 eV dari TiO_2 -anatase merupakan selisih absolut antara posisi tingkat energi pita konduksi (kurang lebih -4,5 eV) dengan posisi tingkat energi pita valensi (kurang lebih -7,7 eV). Posisi tingkat energi pita valensi, sisi tempat terjadinya h^+_{pv} , sebesar itu kira-kira mempunyai potensial oksidasi lebih besar dari 3 Volt. Ini mengindikasikan bahwa h^+_{pv} pada permukaan TiO_2 merupakan spesi oksidator kuat, akan mengoksidasi spesi kimia lainnya yang mempunyai potensial redoks lebih kecil, termasuk dalam hal ini molekul air dan atau gugus hidroksil yang akan menghasilkan radikal hidroksil.

Proses fotodegradasi senyawa organik dengan bantuan fotokatalis semikonduktor akan menghasilkan produk-produk mineralisasi. Karbon dalam senyawa organik berubah menjadi CO_2 , nitrogen menjadi ion nitrat dan ion ammonium serta belerang menjadi ion sulfat (Vautler *et al.* 2001).

Dalam aplikasinya, fotokatalis semikonduktor TiO_2 berbeda fasa dengan substrat sehingga disebut fotokatalis heterogen. Reaksinya sangat tergantung pada konsentrasi salah satu reaktan yang terabsorpsi pada permukaan semikonduktor sendiri. Cacat kristal sangat penting dalam meningkatkan konduktivitas material, cacat kristal mampu menahan agar pasangan $h^+_{pv} - e^-_{pk}$ tetap berada dan bergerak sepanjang permukaan.

2.4. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometri merupakan metoda analisa yang didasarkan pada pengukuran serapan sinar monokromatis suatu larutan dengan menggunakan monokromator sistem prisma atau kisi difraksi dan detektor fotosel. Spektrofotometer adalah alat digunakan untuk mengukur serapan radiasi suatu larutan (Fritz dan Schenk, 1979).

Karakteristik dari gelombang cahaya ditentukan oleh panjang gelombang, biasanya dinyatakan dalam nanometer (nm). Radiasi elektromagnetik UV-Vis mempunyai panjang gelombang berkisar 200 – 800 nm (Skoog *et al.*, 1996). Sinar UV mulai dari 200-400 nm dan sinar tampak 400-800 nm. Absorpsi radiasi akan menyebabkan terjadinya eksitasi elektron. Penggunaan spektrofotometer UV-Vis pada senyawa organik adalah berdasarkan transisi $n-\pi^*$ dan $\pi-\pi^*$. Atom atau molekul akan mengabsorpsi pada daerah panjang gelombang yang energinya sesuai dengan beda energi antara keadaan dasar dan keadaan tereksitasi dari atom atau molekul. Panjang gelombang yang diabsorpsi spesifik untuk masing-masing senyawa.

Suatu spektrofotometer tersusun dari sumber spektrum sinar yang kontinu, monokromator, sel pengabsorpsi untuk larutan sampel atau blanko dan suatu alat untuk mengukur perbedaan absorpsi antara sampel dan blanko ataupun pembanding. Sebagai sumber cahaya biasanya digunakan lampu hidrogen atau deuterium untuk pengukuran ultraviolet dan lampu tungsten untuk pengukuran pada cahaya tampak. Lampu deuterium mengandung gas deuterium pada kondisi tekanan rendah dan dihubungkan

dengan tegangan tinggi akan menghasilkan suatu spektrum kontinu yang merupakan spektrum UV.

Wadah sampel adalah sel untuk menaruh cairan ke dalam berkas cahaya spektrofotometer. Sel ini haruslah meneruskan energi cahaya dalam daerah spektral yang diinginkan sehingga dalam hal ini digunakan sel kaca untuk melayani daerah tampak dan sel kuarsa atau kaca silika untuk daerah ultraviolet. Sel tampak dan ultraviolet yang khas mempunyai tebal lajur larutan sebesar 1 cm (Fritz *et al.*, 1979).

Spektrofotometer UV-Vis adalah alat untuk pengukuran panjang gelombang dan intensitas sinar ultraviolet dan cahaya tampak yang diabsorpsi oleh sampel. Pelarut yang dipilih harus tidak mengganggu absorpsi senyawa yang akan dipelajari. Pelarut tidak boleh menyerap radiasi pada daerah absorpsi dan tidak menimbulkan interaksi dengan senyawa yang bersangkutan. Senyawa polar seperti air dan alkohol adalah baik untuk pelarut dan spektrofotometer UV-Vis.

Salah satu kegunaan spektrofotometer UV-Vis adalah untuk menganalisis senyawa organik secara kuantitatif dengan menggunakan hukum Lambert-Beer. Spektrum UV-Vis sangat berguna untuk pengukuran secara kuantitatif. Konsentrasi dari analit dalam suatu larutan bisa ditentukan dengan menggunakan absorban pada panjang gelombang tertentu. Hukum Lambert-Beer adalah hubungan linearitas antara absorban dengan konsentrasi larutan analit, biasanya hukum Lambert-Beer ditulis (Skoog *et al.*, 1996) :

$$A = \epsilon b c$$

Dimana : A = Absorban

ϵ = Absorpsivitas Molar ($M^{-1}cm^{-1}$)

b = Tebal lajur larutan (cm)

c = Konsentrasi (M)

III. BAHAN DAN METODE

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kimia Analitik Terapan, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas Padang pada bulan April 2007 sampai Desember 2007.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Alat yang digunakan adalah spektrofotometer UV-Vis (S. 1000 Secomam, Sarcelles Perancis) yang digunakan untuk mengukur spektrum serapan larutan standar dan larutan uji dari senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D), kotak iradiasi yang dilengkapi dengan lampu ultraviolet (UV) 10 watt, dengan panjang gelombang (λ) = 365 nm (Germicidal CE G13 Base 8 FC11004) yang digunakan sebagai tempat melakukan iradiasi (gambar pada Lampiran 6), sentrifus dengan kecepatan 6000 rpm (Profuge, Model No : PRF 6KP, Korea) yang digunakan untuk memisahkan katalis TiO_2 -anatase dari larutan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D), pengaduk magnetik (SRS 116 AA, Advantec) yang digunakan sebagai pengaduk larutan saat berlangsungnya fotolisis, neraca analitik, pipet takar, Erlenmeyer, labu ukur dan peralatan gelas lainnya.

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) yang merupakan bahan aktif utama di dalam pestisida Sidamin 865 AS[®] (diproduksi oleh PT Petrosida Gresik, Indonesia) dengan kandungan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) sebesar 72 %, TiO_2 -anatase (Ishihara Sangyo, Ltd. Japan) sumbangan dari Prof. Tadao Sakai dan akuades sebagai pelarut.

3.3. Prosedur Kerja

3.3.1. Pengukuran Spektrum Serapan 2,4-D

Sebanyak 0,138 mL 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dilarutkan ke dalam akuades sampai volume 1000 mL untuk mendapatkan larutan induk 100 mg/L. Kemudian larutan induk 100 mg/L diencerkan menjadi 0, 5, 10, 15, 20 dan 25 mg/L. Kelima variasi konsentrasi larutan tersebut masing-masing diukur spektrum serapannya dengan spektrofotometer UV-Vis. Kemudian diambil data absorbansi pada panjang gelombang yang memberikan serapan maksimum.

3.3.2. Degradasi 2,4-D Secara Fotolisis dengan Variasi Waktu

Larutan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan konsentrasi 20 mg/L dimasukkan ke dalam enam buah Erlenmeyer 25 mL dengan volume masing-masing 20 mL. Setelah itu dilakukan fotolisis terhadap masing-masingnya dengan variasi waktu 0, 15, 30, 45, 60, dan 90 menit. Kemudian ditentukan spektrum serapan larutan yang telah difotolisis tersebut dengan spektrofotometer UV-Vis.

3.3.3. Degradasi 2,4-D Secara Fotolisis dengan Variasi Berat TiO_2 -anatase

Larutan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan konsentrasi 20 mg/L dimasukkan ke dalam empat buah Erlenmeyer 25 mL dengan volume masing-masing 20 mL. Kemudian ke dalamnya ditambahkan TiO_2 -anatase sebanyak 0,010, 0,040, 0,070 dan 0,100 g. Setelah itu dilakukan fotolisis terhadap masing-masingnya selama 120 menit. Selanjutnya larutan yang telah difotolisis disentrifus selama 15 menit untuk memisahkan TiO_2 -anatase dari larutan. Kemudian masing-masing larutan diukur serapannya dengan spektrofotometer UV-Vis.

3.3.4. Pengaruh Pengadukan terhadap Persentase Degradasi 2,4-D

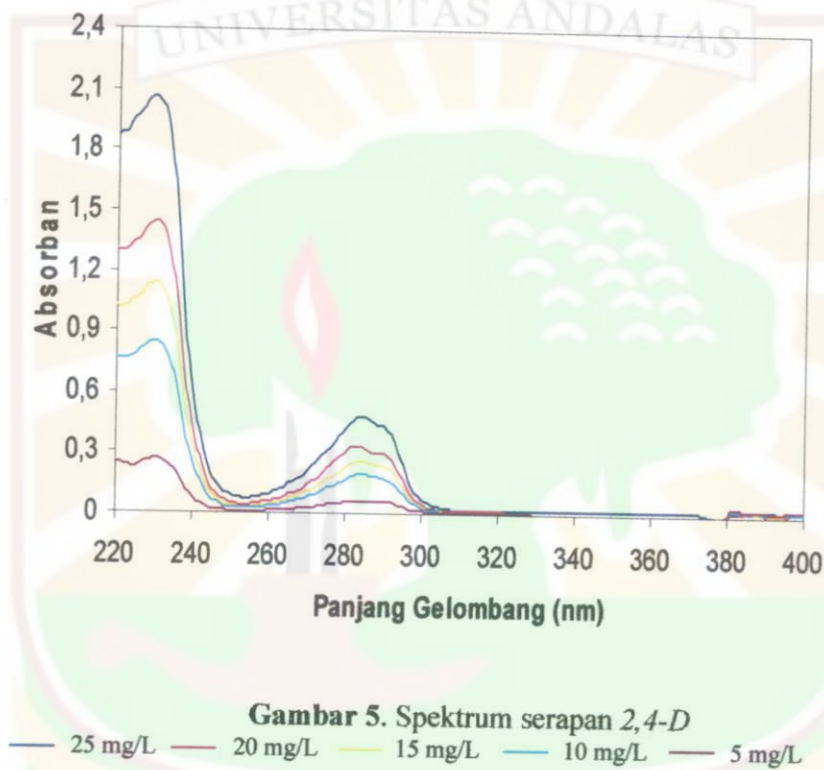
Larutan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan konsentrasi 20 mg/L sebanyak 20 mL dimasukkan ke dalam 12 buah Erlenmeyer. Kemudian ke dalam masing-masing larutan ditambahkan TiO_2 -anatase sebanyak 0,100 g. Enam buah larutan diaduk dengan menggunakan pengaduk magnetik dan difotolisis masing-masing selama 0, 15, 30, 45, 60 dan 90 menit. Hasil fotolisis dengan pengadukan dan tanpa pengadukan disentrifus selama 15 menit untuk memisahkan TiO_2 . Selanjutnya diukur serapannya dengan Spektrofotometer UV-Vis.



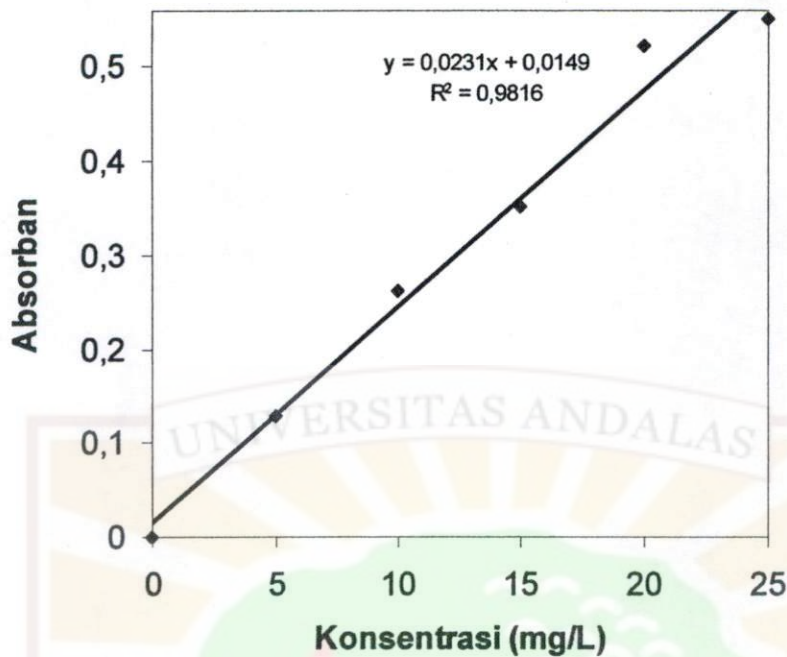
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengukuran Spektrum Serapan 2,4-D

Pengukuran spektrum serapan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) 0, 5, 10, 15, 20 dan 25 mg/L dalam pelarut akuades dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Spektrum serapan 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat dapat dilihat pada Gambar 5.



Hasil pengukuran serapan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) memperlihatkan puncak serapan maksimum pada panjang gelombang 284 nm. Dari nilai serapan ini dapat dihitung nilai absorpsivitas molar (ϵ) yang nilainya spesifik terhadap masing-masing senyawa. Berdasarkan hukum Lambert-Beer didapatkan nilai absorpsivitas molar rata-rata adalah $5462,97 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Perhitungan nilai absorpsivitas molar ini dan data absorban 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dalam pelarut akuades pada panjang gelombang 284 nm dapat dilihat pada Lampiran 1.



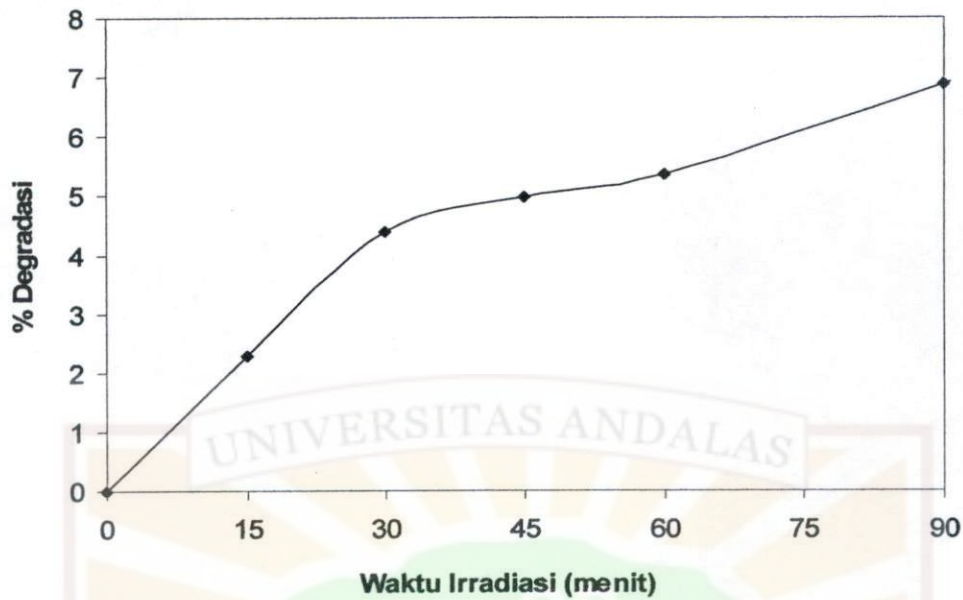
Gambar 6. Kurva kalibrasi standar 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D)

Hubungan yang linear antara konsentrasi 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan absorban dapat dilihat pada Gambar 6. Dalam penelitian selanjutnya digunakan larutan 2,4-D 20 mg/L sebagai larutan yang akan difotolisis.

4.2. Pengaruh Waktu Irradiasi terhadap Degradasi 2,4-D

Larutan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan konsentrasi 20 mg/L, yang akan difotolisis diposisikan tegak lurus terhadap lampu ultraviolet dengan jarak 20 cm kemudian difotolisis masing masing selama 0, 15, 30, 45, 60, dan 90 menit. Pengaruh waktu iradiasi terhadap persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dapat dilihat pada Gambar 7.

MILIK
UPT PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS ANDALAS



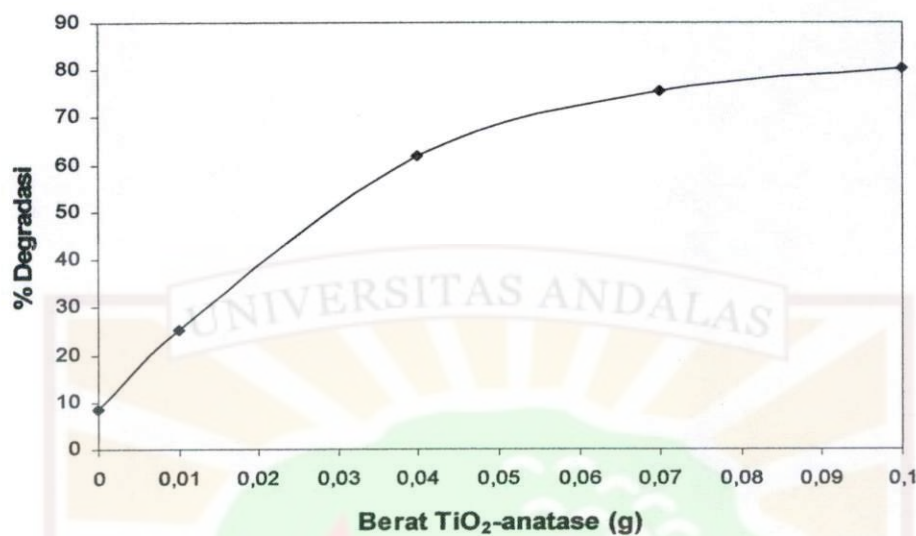
Gambar 7. Pengaruh waktu irradiasi terhadap degradasi 2,4-D
[2,4-D] = 20 mg/L

4.3. Pengaruh TiO_2 -anatase terhadap Degradasi 2,4-D

Fotolisis senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) 20 mg/L dengan penambahan 0,000, 0,010, 0,040, 0,070 dan 0,100 g TiO_2 -anatase selama 120 menit memperlihatkan perbedaan persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D), seperti terlihat pada Gambar 8.

Dari Gambar 8 di bawah, dapat dilihat bahwa dengan penambahan TiO_2 -anatase pada proses irradiasi senyawa 2,4-D selama 120 menit menunjukkan peningkatan persentase degradasi senyawa 2,4-D seiring dengan pertambahan berat TiO_2 -anatase yang digunakan sebagai katalis. Hal ini terjadi karena pada proses irradiasi senyawa 2,4-D dengan penambahan TiO_2 -anatase menyebabkan absorpsi sinar UV oleh titanium dioksida yang akan diikuti perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron pada pita konduksi (e^-_{pk}) dan lubang positif pada pita valensi (h^+_{pv}). Fotolisis yang disertai dengan penggunaan katalis disebut fotokatalisis. Pada metoda fotokatalisis, radikal OH dihasilkan melalui oksidasi

permukaan anion hidroksida dan penyerapan molekul senyawa organik pada permukaan semikonduktor dengan adanya *hole* pada pita valensi.



Gambar 8. Kurva pengaruh penambahan TiO_2 -anatase terhadap % degradasi 2,4-D

Peningkatan persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) terjadi karena semakin banyak 2,4-D yang diserap pada permukaan TiO_2 dengan adanya *hole* yang bermuatan positif. *Hole* pada TiO_2 ini akan bereaksi dengan molekul H_2O atau ion OH^- memproduksi radikal hidroksil dan radikal hidroksil tersebut akan mendekomposisi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D). Peningkatan persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) juga disebabkan ion H^+ bereaksi dengan O^{2-} yang terkandung dalam air sehingga akan meningkatkan jumlah H_2O_2 . Akibat meningkatnya jumlah H_2O_2 maka bertambah banyak dihasilkan jumlah radikal hidroksil yang berperan dalam mendegradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D). Jadi substrat atau senyawa yang akan didegradasi dalam ketersediaan oksigen, tidak mengalami transfer muatan secara langsung tetapi melibatkan terbentuknya hidrogen peroksida lebih dahulu sebagai sumber radikal hidroksil. Pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase, persentase degradasi senyawa 2,4

(diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) sebesar 80,12 %. Data dan perhitungan persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan penambahan variasi berat TiO_2 -anatase dapat dilihat pada Lampiran 3.

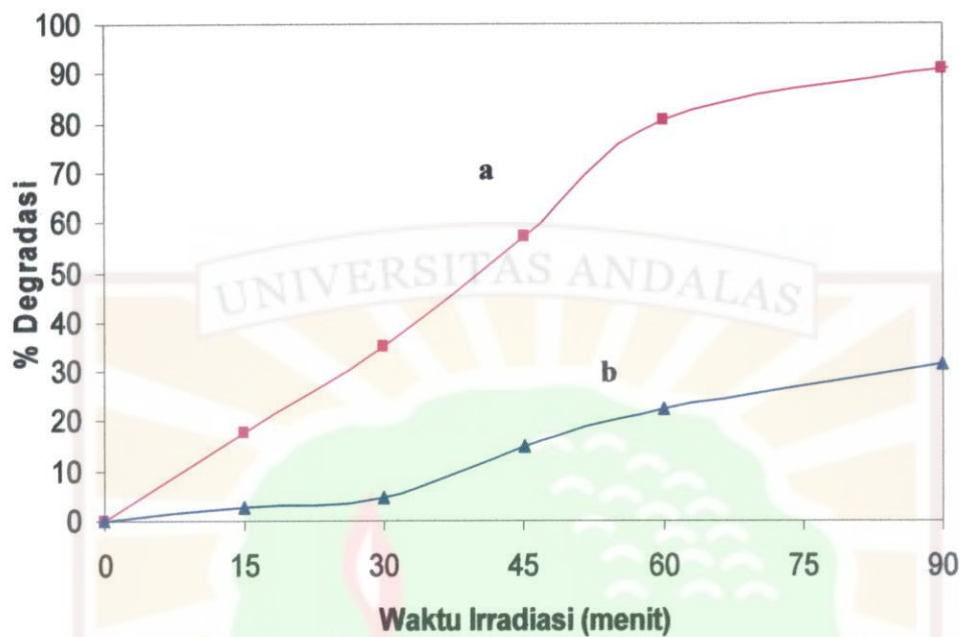
4.4. Pengaruh Pengadukan terhadap Persentase Degradasi dengan Variasi Waktu Fotolisis

Larutan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) 20 mg/L yang telah ditambah dengan 0,100 g TiO_2 -anatase ketika dilakukan irradiasi ultraviolet dengan pengadukan dan tanpa pengadukan memperlihatkan persentase degradasi yang cukup signifikan. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 9, dimana dalam waktu 90 menit pada proses fotolisis tanpa pengadukan terjadi penurunan absorban dari 0,523 menjadi 0,358 dengan persentase 31,55 %. Sedangkan proses fotolisis pada waktu yang sama dengan menggunakan *magnetik stirer* sebagai pengaduk hasil pengukuran absorban dengan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan serapan yang sangat kecil dan diperoleh persen degradasinya sebesar 90,93 %. Perbandingan spektrum serapan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) sebelum dan sesudah difotolisis dengan penambahan TiO_2 -anatase dapat dilihat pada Gambar 10.

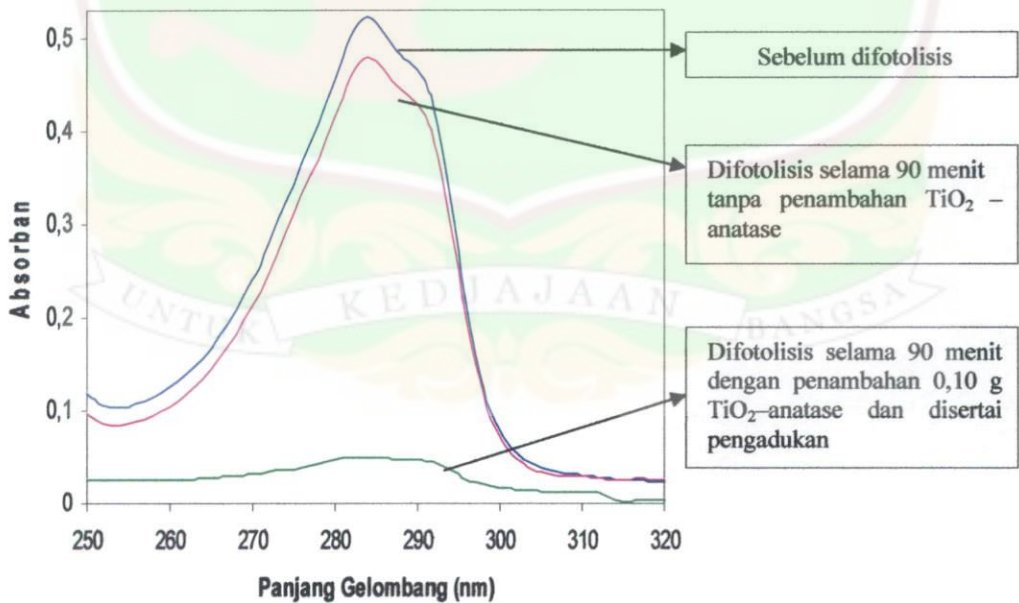
Proses pengadukan sebenarnya adalah membantu membentuk keseimbangan proses absorpsi pada permukaan semi konduktor, karena jika proses tidak seimbang (absorpsi besar dari desorpsi) maka proses masuknya substrat selanjutnya akan terhalangi. Akibatnya efisiensi fotokatalis menjadi rendah (Hoffmann *et al.*, 1995). Di samping itu pengadukan juga akan sangat membantu proses pelarutan oksigen ke dalam suspensi serta Adamson (1990) melaporkan bahwa oksigen berperan penting dalam fotokatalis.

Persentase degradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) juga meningkat dengan bertambahnya waktu. Semakin lama waktu fotolisis dengan

penambahan TiO_2 -anatase maka semakin banyak terbentuk radikal OH yang sangat berperan dalam mendegradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D).



Gambar 9. Kurva pengaruh pengadukan terhadap % degradasi 2,4-D
(a) fotolisis dengan pengadukan, (b) fotolisis tanpa pengadukan.



Gambar 10. Perbandingan spektrum serapan 2,4-D
[2,4-D]= 20 mg/L.

Perbedaan yang cukup signifikan antara proses fotolisis tanpa pengadukan dengan fotolisis disertai pengadukan seperti yang terlihat pada Gambar 9, terjadi karena dengan pengadukan partikel TiO_2 -anatase tersebar lebih merata di seluruh permukaan larutan sehingga interaksi antara muatan permukaan TiO_2 dengan senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) lebih sempurna sehingga dalam waktu yang lebih singkat dapat diperoleh persentase degradasi yang lebih besar jika dibandingkan dengan proses fotolisis tanpa disertai pengadukan. Data absorban 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) 20 mg/L setelah difotolisis tanpa pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase pada variasi waktu dan perhitungan persentase degradasinya dapat dilihat pada Lampiran 4. Sedangkan data absorban senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) 20 mg/L setelah difotolisis yang disertai dengan pengadukan dan penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase pada variasi waktu dan perhitungan persentase degradasinya dapat dilihat pada Lampiran 5.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Metoda fotolisis dengan menggunakan lampu 10 Watt dengan panjang gelombang 365 nm untuk mendegradasi senyawa 2,4 (diklorofenoksi) asam asetat (2,4-D) dengan konsentrasi 20 mg/L selama 90 menit diperoleh persentase degradasi sebesar 6,88 %. Untuk senyawa dan konsentrasi yang sama dalam waktu iradiasi yang sama pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase diperoleh persentase degradasi sebesar 31,55%, dan jika diaduk selama proses iradiasi berlangsung terdegradasi sebanyak 90,93 %.

5.2 Saran

Untuk peneliti selanjutnya disarankan menggunakan wadah sampel yang memiliki permukaan luas sehingga sinar UV dapat diserap lebih banyak dan melakukan identifikasi produk yang terbentuk pada fotolisis dengan HPLC.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A. W. 1990. *Physical Chemistry of Surface*, 5th ed, John Wiley & Sons, New York, pp 710-731
- Andayani, W dan A, Sumartono. 1999. Aplikasi Radiasi Pengion Dalam Penguraian Limbah Industri I. Radiolisis Larutan Standar Zat Warna Reaktif Cibacron Violet 2 R, *Majalah Batan*. Vol XXXII No. 1 / 2, Januari/April.
- Departemen Pertanian. 2006. Pestisida Terdaftar. Dirjen Tanaman Pangan, Jakarta, hal 116-117
- Fritz J. S dan G. H. Schenk. 1979. *Quantitative Analytical Chemistry*. 4th ed. Allyn and Bacon, Inc. Boston. 77 – 90.
- Fujishima, A.K., T.N. Rao dan D.A. Tryk. 2000. Titanium Dioxide Photocatalysis. *J. Photochemistry and Photobiology C. Photochemistry Reviews*. 1 – 21.
- Gunlazuardi, J dan Winarti Andayani. 2002. Evaluasi Deklorinasi dan Pemecahan Cincin Aromatis Selama Degradasi Pentaklorofenol Secara Fotokatalisis Pada Permukaan Lapisan Tipis Titanium Dioksida, Jurusan Kimia, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI-Depok.
- Gunlazuardi J. 2001, Fotokatalisis pada permukaan TiO₂: Aspek Fundamentalik dan Aplikasinya, *Seminar Nasional Kimia Fisika II*, Jurusan Kimia FPMIPA UI, Depok.
- Gunlazuardi, J, F.H. Fajar dan H. Suseno. 2002. Penentuan Karbon Total Melalui Oksidasi Secara Fotokatalitik-Konduktometri. Kimia FMIPA UI. Depok.
- Hoffmann. M. R., S. T. Martin, W. Choi., D. W. Bahneman, 1995 *Environmental Applications of semiconductor photocatalysis*, Chem. Rev. (95): 69-96.
- Jafari, AJ dan Marofi S. 2005. Photo-Chemical Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) in the Effluent. *J. Res. Health Sci*, 5 : (2). 27-31.
- Juo, A.S.R. and O.Ogini. 1978. Adsorption and desorption of 2,4-D in acid tropical soil. *J. Environ. Qual.* 7 (1): hal 9-12
- Kamat, Prashant V. 2003. Nanoscience opportunities in Environmental Remediation. *J. C. R. Chimie* 6 (2003) : 999-1007
- Kameyama, T. 2002. *Robust Science and Technology for Safe and Secure Life Space Photocatalys*. Ainst's Photocatalyst.

- Kuo, W.S dan P. H. Ho. 2001. Solar Photocatalytic Decolorization of Methylene Blue in Water. *J. Chemosphere*. 45: hal 77 – 83.
- Lasut, M. T. P. Bobby dan A. K. Veronoki. 2001. Kompalasi Tingkat Toksisitas Beberapa Pestisida (Endosulfan, Fentoat, BPMC, 2,4-D) Dengan menggunakan ikan bandeng (*Chanos Chanos Forsk*). Hasil penelitian Universitas Sam Ratulangi. Manado. Kameyama, T. 2002. *Robust Science and Technology for Safe and Secure Life Space Photocatalyst*, Ainst's Photocatalyst.
- Peller, J, O. Wiest dan P. V. Kamat. 2001. Sonolysis of 2,4 Dichlorophenoxyacetic Acid in Aqueous Solutions. Evidence for OH- radikal-Mediated Degradation. *J. Phys. Chem. A*. 105, hal 3176 – 3181.
- Prado, A.G.S, Eny M.V. dan M.Olimpia. 2001. Monitoring of the Harmful Concentration of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) in Soils with and without Organic Matter. *J. Braz. Chem. Soc.*, 12 : (12), 485-488.
- Riza, V.T. dan Gayatri. 1994. Ingatlah Bahaya Pestisida, Bunga rampai Residu Pestisida dan Alternatifnya. Pesticida Action Network (PAN). Jakarta
- Safni, Maizatisna, Zulfarman dan T. Sakai. 2007. Degradasi zat warna Naphtol Blue Black secara sonolisis dan fotolisis dengan penambahan TiO₂-anatase, *J. Ris Kim*. 1.(1), 43 – 49.
- Safni, Umiati Loekman dan Fitra Febrianti. 2008. Degradasi Zat Warna Sudan I Secara Sonolisis dan Fotolisis Dengan Penambahan TiO₂-anatase. *J. Ris. Kim*. 1. (2), 164-170.
- Safni, Zulfarman, Dina Fitri Wulandari. 2008. Degradasi Indigo Carmin Secara Sonolisis dan Fotolisis Dengan Penambahan TiO₂-anatase. *J. Sain MIPA* (Submitted).
- Safni, Zulfarman, Fardila Sari. 2008. Degradasi Metanil Yellow Secara Sonolisis dan Fotolisis Dengan Penambahan TiO₂-anatase. *J. Forum Penelitian* (Submitted).
- Safni, Zamzibar Zuki, Cheri, Haryati, Maizatisna. 2008. Degradasi Zat Warna Alizarin Secara Sonolisis dan Fotolisis Dengan Penambahan TiO₂-anatase. *J. Pilar* (Submitted).
- Sriyani, N. 2006. Pengembangan Teknik Bioassay Sebagai Metode Deteksi Residu Herbisida Dalam Tanah dan Air. Faperta. Universitas Lampung.
- Skoog, D.A., D.M. West dan F.J Holler. 1996. Fundamental of Analytical Chemistry. 6th. Saunders College Publishing. Philadelphia. 406.
- Sudarmo, S. 1991. Pestisida. Kanisius. Yogyakarta.
- Tu, Berlin, R. Wolf, R. Nebelsieck. 2001. Weed Control Methods Handbook, *The Nature Conservancy*. 7a:1-8.

- Vautler, M., C. Guillard dan J.M. Hermann. 2001. Photocatalytic Degradation of Dyes in Water: Case Study of Indigo and Indigo Carmine. *J. Catalyst*. 201: 51
- Walters, J. 2006. Environmental Fate of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid. Department of Pesticide Regulation. Sacramento.
- Yulianto, M.E., Dwi Handayani dan Silviana. 2005. Kajian Pengolahan Limbah Industri Fatty Alkohol dengan Teknologi Photokatalitik Menggunakan Energi Surya. *Gema Teknologi* 22.



Lampiran 1. Perhitungan penentuan absorpsivitas molar (ϵ)

Tabel 1. Data absorban 2,4-D pada variasi konsentrasi

Konsentrasi (mg/L)	Absorban (A)
0	0
5	0,128
10	0,263
15	0,352
20	0,523
25	0,552

Rumus : $\epsilon = \frac{A}{b \times c} \times Mr$

dimana :

A = Absorban

b = Lajur larutan (cm)

c = Konsentrasi (g L⁻¹)

ϵ = Absorpsivitas molar relatif (M⁻¹ cm⁻¹)

Mr = Masa molar relatif (g mol⁻¹)

- Untuk konsentrasi larutan 5 mg/L

$$\epsilon = \frac{0,128}{1\text{cm} \times 0,005 \text{ g L}^{-1}} \times 221,0 \text{ g mol}^{-1} = 5657,60 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$

- Untuk Konsentrasi larutan 10 mg/L

$$\epsilon = \frac{0,263}{1\text{cm} \times 0,010 \text{ g L}^{-1}} \times 221,0 \text{ g mol}^{-1} = 5812,30 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$

- Untuk konsentrasi 15 mg/L

$$\epsilon = \frac{0,352}{1\text{cm} \times 0,015 \text{ g L}^{-1}} \times 221,0 \text{ g mol}^{-1} = 5186,13 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$

- Untuk konsentrasi 20 mg/L

$$\epsilon = \frac{0,523}{1\text{cm} \times 0,020 \text{ g L}^{-1}} \times 221,0 \text{ g mol}^{-1} = 5779,15 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$

- Untuk konsentrasi 25 mg/L

$$\varepsilon = \frac{0,552}{1\text{cm} \times 0,025 \text{ g L}^{-1}} \times 221,0 \text{ g mol}^{-1} = 4879,68 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$

Absorpsivitas molar (ε) rata rata

$$= \frac{5657,60 + 5812,30 + 5186,13 + 5779,15 + 4879,68 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}}{5}$$

$$= 5462,97 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$$



Lampiran 2. Perhitungan persen degradasi 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis dengan variasi waktu tanpa penambahan TiO_2 -anatase

Tabel 2 . Data absorban dan persentase degradasi 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis selama 0, 15, 30, 45, 60 dan 90 menit

Waktu	Absorban awal	Absorban akhir	% Degradasi
0	0,523	0,523	0
15	0,523	0,511	2,29
30	0,523	0,500	4,39
45	0,523	0,497	4,97
60	0,523	0,495	5,35
90	0,523	0,487	6,88

$$\text{Persen degradasi} = \frac{A_{\text{awal}} - A_{\text{akhir}}}{A_{\text{awal}}} \times 100 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L selama 15 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,511}{0,523} \times 100\% = 2,29 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L selama 30 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,500}{0,523} \times 100\% = 4,39 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L selama 45 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,497}{0,523} \times 100\% = 4,97 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L selama 60 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,495}{0,523} \times 100\% = 5,35 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L selama 90 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,487}{0,523} \times 100\% = 6,88 \%$$

Lampiran 4. Perhitungan persentase degradasi 2,4-D 20 mg/L setelah difotolisis tanpa pengadukan pada penambahan TiO_2 -anatase 0,10 g terhadap variasi waktu.

Tabel 4. Data absorban dan persentase degradasi 2,4-D 20 mg/L pada penambahan TiO_2 -anatase sebanyak 0,10 g tanpa pengadukan terhadap variasi waktu.

Berat TiO_2	Waktu	Absorban awal	Absorban akhir	% Degradasi
0	0	0,523	0,523	0
0,1	15	0,523	0,508	2,87
0,1	30	0,523	0,499	4,59
0,1	45	0,523	0,445	14,91
0,1	60	0,523	0,405	22,56
0,1	90	0,523	0,358	31,55

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,000 g TiO_2 anatase selama 15 menit.

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,508}{0,523} \times 100\% = 2,87 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase selama 30 menit.

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,499}{0,523} \times 100\% = 4,59 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase selama 45 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,445}{0,523} \times 100\% = 14,91 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase selama 60 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,405}{0,523} \times 100\% = 22,56 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO_2 anatase selama 90 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,358}{0,523} \times 100\% = 31,55 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L tanpa pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO_2 -anatase selama 120 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,104}{0,523} \times 100\% = 80,12 \%$$

Lampiran 5. Perhitungan persentase degradasi 2,4-D 20 mg/L pada variasi waktu fotolisis disertai pengadukan pada penambahan 0,100 g TiO₂- anatase.

Tabel 5. Data absorban dan persentase degradasi 2,4-D 20 mg/L difotolisis disertai pengadukan pada variasi waktu dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase.

Berat TiO ₂	Waktu	Absorban awal	Absorban akhir	% Degradasi
0	0	0,523	0,523	0
0,1	15	0,523	0,429	17,96
0,1	30	0,523	0,339	35,21
0,1	45	0,523	0,223	57,39
0,1	60	0,523	0,100	80,81
0,1	90	0,523	0,047	90,93

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L disertai pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase selama 15 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,429}{0,523} \times 100\% = 17,96 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L disertai pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase selama 30 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,339}{0,523} \times 100\% = 35,21 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L disertai pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase selama 45 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,223}{0,523} \times 100\% = 57,39 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L disertai pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase selama 60 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,100}{0,523} \times 100\% = 80,81 \%$$

- Fotolisis 2,4-D 20 mg/L disertai pengadukan dengan penambahan 0,100 g TiO₂-anatase selama 90 menit

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{0,523 - 0,047}{0,523} \times 100\% = 90,93 \%$$